

基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统

马建平¹, 尚建华^{1*}, 孙嘉瞳¹, 贺岩², 罗远²

¹ 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800

摘要 基于高速脉冲调制和回波采样技术,构建了一套激光测距系统。该系统利用高灵敏度多像素光子计数器的多回波光子信号累加输出的特性实现光电信号转换,借助高速信号采集技术对回波信号进行全波形采集,通过回波波形的累加计算得到了回波信号的精确到达时刻,最终获得了高精度的距离信息。理论分析和实验验证的结果表明,该测距系统在实现远距离目标探测的同时,能够兼顾近距离目标的高精度测距,系统的测距动态范围可达 10^7 ,测距精度为0.6 mm。

关键词 激光测距; 单光子探测器; 多回波光子信号累加; 大动态范围

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0810004

Laser Ranging System Based on High-Speed Pulse Modulation and Echo Sampling

Ma Jianping¹, Shang Jianhua^{1*}, Sun Jiatong¹, He Yan², Luo Yuan²

¹ School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

² Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling technology is developed. Using the high-sensitivity multi-pixel photon counter with the characteristic of multi-echo photon signal accumulative output, the photoelectric signal conversion is realized. By means of the high-speed signal acquisition, the full waveforms of the echo signals are obtained. In addition, the precise arriving time of the echo signal is achieved through the accumulation of the echo signal waveforms. Finally, the high-accuracy laser ranging is realized. The results of the theoretical analysis and the experiments show that the designed laser ranging system can realize long range target detection as well as short range laser ranging with high precision. Meanwhile, the dynamic range is up to 10^7 and the ranging accuracy reaches 0.6 mm.

Key words laser ranging; single photon detector; multi-echo photon signal accumulation; large dynamic range

OCIS codes 280.3400; 280.3420; 280.3640

1 引言

激光测距技术是应用最广泛的激光传感技术之一,广泛应用于军事、航天领域中的远距离目标探测,工业应用中近距离目标的高可靠性探测,以及民用领域中的高速高精度目标探测等。近年来,自动驾驶^[1]、无人机^[2]、智能移动机器人、智能仓储、安防预警等行业的迅速发展,对激光测距系统提出了更

高的要求。自动驾驶系统需具有高精度的激光测距性能,且作用距离范围较广;对于执行避障及观测任务的无人机而言,其对测距系统的体积和质量要求较高;智能机器人对测距的动态范围和测距系统的生产成本要求较高。因此,降低激光测距系统的制造成本,减小系统的体积和质量,提升系统的测距性能,已成为激光测距技术面对的关键挑战。

激光测距主要是基于飞行时间原理实现的,根

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(51403034)

* E-mail: jhshang@dhu.edu.cn

据实现方式的不同,可分为直接飞行时间测距和间接飞行时间测距。直接飞行时间测距,是通过测量激光脉冲往返目标的飞行时间而获取目标的距离信息;根据实现方法的不同,可将间接飞行时间测距分为线性调频式激光测距、相位式激光测距和调幅式激光测距。近期,有学者提出基于相位差测频的调频连续波激光测距方法,一定程度上提高了测距的精度和稳定性,促进了激光测距技术在精密制造等领域的应用和推广^[3]。针对大范围测距应用,基于飞行时间原理的激光测距系统始终面临着动态探测范围这一问题。通常,多通道探测的工作方式可以实现大动态范围的测距^[4],但这将造成系统结构复杂、体积大、成本高等问题,不利于激光测距技术的推广。而飞秒光频梳激光测距和相干激光测距,又受限于制造成本,很难在民用领域得到广泛应用。因此,基于飞行时间原理的脉冲激光测距技术是当前民用测距应用中使用较为普遍的探测手段。

目前,脉冲激光测距技术出现了许多新型的测距方式,包括基于高速伪随机码调制的脉冲激光测距技术^[5]、多脉冲激光测距技术^[6]和基于时间至數位转换器(TDC)的激光测距技术。基于高速伪随机码调制的脉冲激光测距技术利用信号与噪声/噪声与噪声不相关、信号与信号完全相关的特性,通过相关运算,提取出深埋于噪声中的周期信号,并通过处理得到目标的距离信息^[7]。该技术可以在一定序列编码内实现高精度远距离测距,但编码序列的平衡性和相关性都存在一定的不足,且码型的不足也将直接影响系统的测距性能^[8]。多脉冲激光测距技术能够提升回波信号的信噪比(SNR),实现高精度

距离测量,但后期处理较复杂,测距速率显著降低。基于精密时间间隔而实现测距的 TDC 激光测距系统,一般需借助雪崩光电二极管(APD)探测器探测信号,因而难以实现低功率测量,且测距范围有限;该测距系统的实际工作环境往往较为复杂,系统中的电路常会受到外界高频信号的干扰,致使 TDC 中产生噪声,严重影响了测距精度^[9]。

为了满足新型测距应用中大动态范围探测的要求,有效地解决制造成本、系统体积和测量精度等问题,本文提出一种低成本、大动态范围、高精度的激光测距方法,借助新型高灵敏度光子计数装置多像素光子计数器(MPPC),并基于高速信号采集的回波信号全波形采样技术,搭建了一套激光测距系统,最后通过实验验证了系统的测距精度和动态范围。

2 系统测距原理

图 1 所示为基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统的原理框图。激光光源在驱动信号的作用下,按照驱动时序发射脉冲激光,经光学准直系统作用后照射在地物目标上。目标反射的回波信号光由接收系统接收,经光电探测器作用后转换为电信号。该电信号依次经放大电路和整形电路,由高速数据采集卡进行全波形采样,最后由现场可编程门阵列(FPGA)处理电路对其进行处理,获取激光脉冲射出时刻与其回波信号到达时刻之间的时间差,进而得到目标的距离信息。其中,FPGA 处理电路在对回波信号进行高速处理的同时,还负责发送高速脉冲调制所需的时序信号。

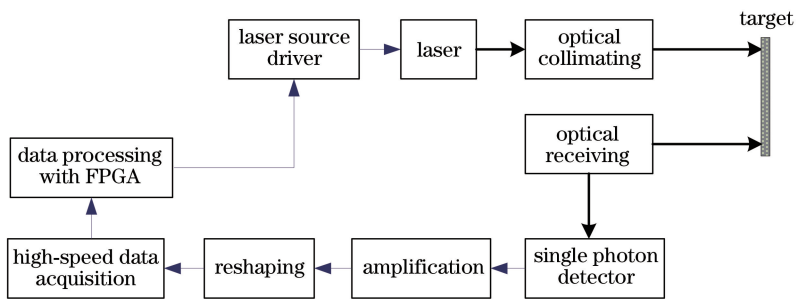


图 1 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统原理框图

Fig. 1 Laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling

测距系统中的探测器为新型光子探测器 MPPC,其具有工作电压低、灵敏度高、可实现光子计数和探测动态范围大等特点,性能参数如表 1 所示。MPPC 是由多个具备单光子探测能力的像元组成的多像素计数器。当 MPPC 中的一个像元

探测到一个入射光子时,会输出一个幅值一定的脉冲,如图 2(a)所示;若多个像元同时接收到入射光子,则每个像元输出的脉冲将会叠加并由一个公共输出端输出,进而获得高增益。不同光子数时 MPPC 的输出信号波形如图 2(b)所示。由图 2

可知, MPPC 的信号输出具有明显的分立性, 脉冲信号的幅值与探测到的光子数成一定比例。因此, MPPC 可以清晰分辨出每个脉冲中所含的光子个数。此外, 当 MPPC 的所有像元都探测到光子时, 探测器达到饱和状态, 输出信号最大; 当入射光继续增强, 探测器输出信号的幅值和波形保持不变。因此, MPPC 具有信号饱和时输出波形不畸变的特性, 这也是其具备大探测动态范围的物理基础。

表 1 MPPC 参数指标

Table 1 Parameters of MPPC

Parameter	Value
Effective photosensitive area / (mm×mm)	1.3×1.3
Pixel pitch / μm	25
Number of pixels	2668
Fill factor / %	47
Spectral response range / nm	350-1000
Photon detection efficiency at 905 nm / %	7
Dark count / s^{-1}	5×10^5
Crosstalk probability / %	6
Gain	1.1×10^6

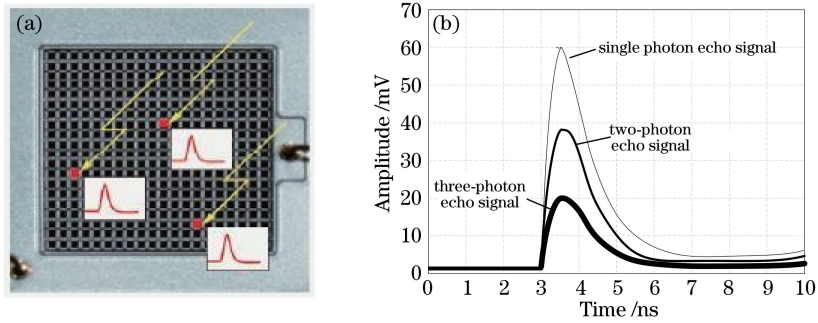


图 2 MPPC 的工作原理及输出信号。(a)工作原理;(b)输出信号

Fig. 2 Working principle and output signal of MPPC. (a) Working principle; (b) output signal

2.1 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距原理

为了提高系统测距精度, 采用多次测量和波形累加的信号处理方法, 其原理如图 3 所示。在周期

为 T_0 的触发信号的控制下, 激光器发射激光脉冲信号; 经目标反射后, 单光子探测器 MPPC 输出的回波脉冲信号经放大和整形处理后, 再由高速数据采

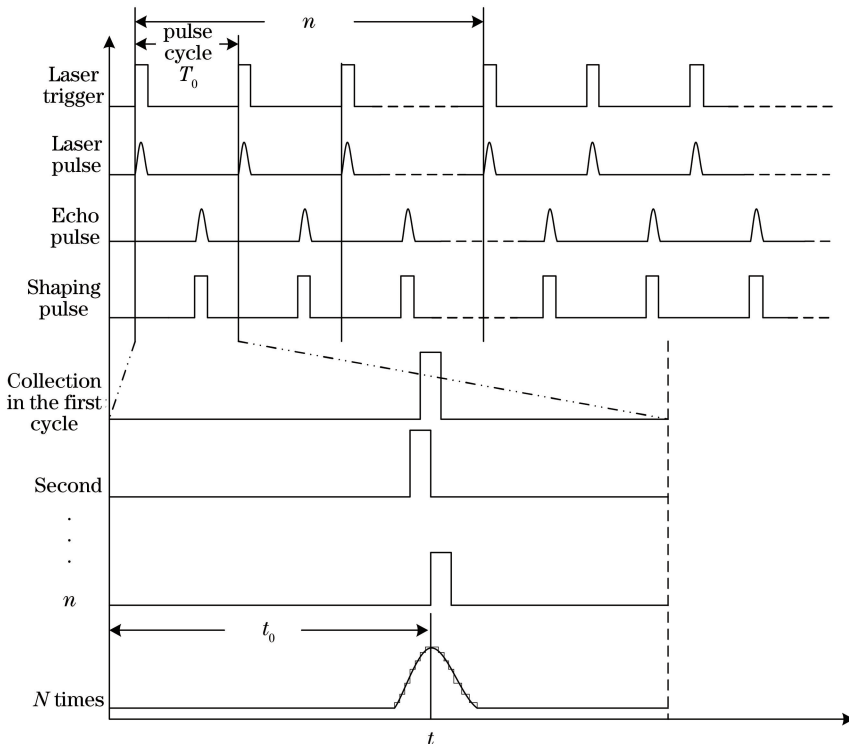


图 3 基于多次测量和波形累加的距离测量原理

Fig. 3 Principle diagram of distance measurement based on multiple measurements and waveform accumulation

集卡进行全波形采样。当信号在测距系统中传递时,系统中的各个元器件均会使信号发生随机的微小时间抖动。因此,选取 n 次测量结果,对 n 次采集所得的全回波波形进行对应位置累加,以得到由时间随机抖动而形成的上升沿和下降沿;然后,通过上升沿和下降沿的位置计算得到回波激光脉冲的准确到达时刻 t_0 ,进而得到可靠的激光脉冲飞行时间,获得更高精度的激光测距性能。在进行波形累加时,累加次数越多,所得的波形越接近于真实波形。

2.2 系统测距性能理论分析

当激光脉冲照射到朗伯目标表面时,单光子探测器能够对测距系统的回波光子信号作出响应,且输出的平均光电子数可借助激光雷达方程求得。设计测距系统时,系统中的光学系统接收视场角大于激光的发散角,因此采用大目标能量形式的激光雷达方程进行求解^[10]。对于激光脉冲单次发射的情况,平均光子计数值 N_s 为

$$N_s = \frac{Pt}{E_0} \frac{\rho}{\pi} \frac{A_c}{R^2} \eta_T \eta_R, \quad (1)$$

式中: P 为激光的发射功率; t 为发射激光的脉冲宽度; ρ 为目标反射率, A_c 为系统接收口径; E_0 为单光子能量; R 为探测距离; η_T 为大气与激光雷达之间的大气透过率,在此为双程大气透过率($\eta_T = 0.8$); η_R 为测距系统的光学效率。

光子计数激光雷达的噪声主要源自探测器视场内的背景光噪声和单光子探测器自身的暗计数,而两种噪声的产生是两个相互独立的随机过程^[11]。因此,系统的平均噪声光子计数 N_{nos} 是平均背景噪声光子计数 N_b 和探测器暗计数 N_{dk} 之和,即

$$N_{nos} = N_b + N_{dk}, \quad (2)$$

其中,平均背景噪声光子数可根据背景光照强度计算得到:

$$N_b = N_{bt} \Delta T, \quad (3)$$

式中: N_{bt} 为单位时间内的背景光子计数率,在 905 nm 波段,其值为 $6.372 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{nm}$; ΔT 为单光子探测器的时域门限宽度,由探测器中积分电路的积分时间决定,为 2 ns。

在没有入射光照射的情况下,由于暗计数的影响,探测器仍然会产生计数脉冲。当探测器的暗计数率为 N_{dark} 时,单光子探测器时域门限宽度 ΔT 范围内的暗计数为

$$N_{dk} = N_{dark} \Delta T. \quad (4)$$

因此,激光测距系统的信噪比 R_{SN} 可表示为

$$R_{SN} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_{dk}^2}}. \quad (5)$$

结合实际测距需求,测距系统主要模块的参数设计情况如表 2 所示。联立(1)~(5)式,代入系统各参数,可获得系统信噪比随探测距离的变化(图 4)。由图 4 可知,测距系统的信噪比随探测距离的增加而减小。当地物目标的反射率为 0.2 时,参数值如表 2 所示的测距系统在信噪比为 10 dB 时达到测距的临界点,此时对应的探测距离为 700 m。因此,测距系统的理论最远可探测距离为 700 m。

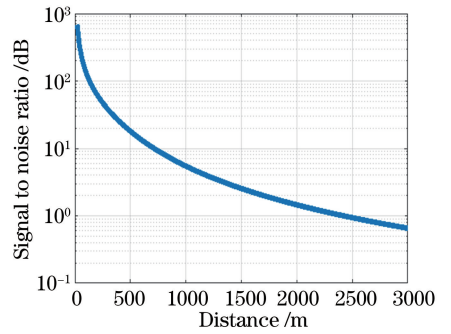


图 4 激光测距系统信噪比与探测距离的关系

Fig. 4 Relationship between SNR and detection distance for laser ranging system

表 2 激光测距系统的主要技术参数

Table 2 Technical parameters of laser ranging system

Item	Parameter	Value
Laser	Wavelength /nm	905
	Repetition frequency /kHz	100
	Laser peak power /W	3
	Pulse width /ns	6
	Divergence angle /mrad	1.5
	Spot diameter /mm	28×10
Optical receiving module	Field of view /mrad	2
	Receiving aperture /mm	22
	Effective receiving aperture /mm	1.3
	Efficiency of optical receiving module	0.2
	Filter bandwidth /nm	10
	Photon counting rate /MHz	0.5-1.5
	Detection probability at 905 nm /%	7

3 实验结果及分析

基于上述测距原理及表 1 所示的系统参数,搭建了一套激光测距系统实验样机,以验证该测距方法的可行性和系统的测距能力。激光测距系统实验样机的主要构成单元如图 5 所示,由主控电路模块、激光光源模块、光学发射/接收模块、探测模块和高速信号采集模块组成。测距系统采用波长为

905 nm的大功率半导体激光器作为光源;主控电路模块输出频率为 100 kHz的触发信号,触发信号进入半导体激光器的驱动电路,在脉冲驱动电流的作用下,激光器发射脉冲激光;光学接收/发射模块负责光信号的接收和发射;回波信号被光学接收模块接收后,聚焦于单光子探测器表面,先进行光电信号转换,然后再作放大和整形处理;信号经采样率为 2 Gbit/s的高速信号采集模块作用后,主控电路模块执行波形累加、飞行时间计算等处理,进而实现激光测距。系统样机搭建完成后,对该系统进行反复测试,以获得系统的最大测距范围和测距精度。

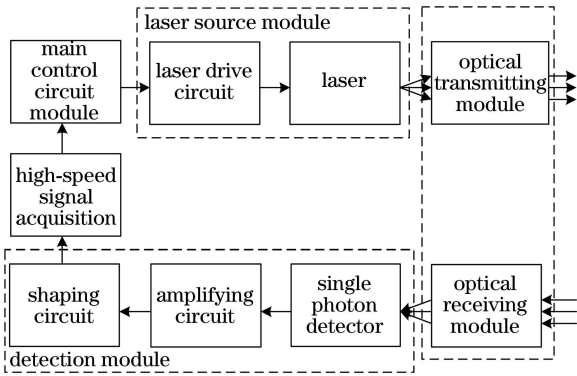


图 5 测距系统实验样机

Fig. 5 Experimental prototype of laser ranging system

3.1 系统测距能力

测距系统中的 MPPC 极为灵敏,可以实现单光子量级的信号测量。但是,在确定系统可测量的最大距离时,回波信号光子数量明显减少,此时太阳光引入的背景噪声将给探测器带来较大的干扰。为此,选择在夜晚进行测试,以有效地去除太阳背景噪声的影响。

实际测试时,由于未找到符合最大测量距离的临界情况,故选取视场内的一个混凝土建筑物目标进行测量,并重复测量 20 次。当激光脉冲峰值功率为 3 W、激光重复频率为 100 kHz、接收口径为 22 mm 及接收视场角为 2 mrad 时,全回波信号经过 512 次叠加之后,得到如图 6 所示的回波信号,该回波信号的幅值约为 100 mV。经主控电路处理后,该目标距离系统 663.58 m,测距结果如图 7 所示。由统计分析可知,测距系统的测距范围可达 663.58 m,测距精度为 75.3 mm。

在实验室环境下,对系统的最小可测距离进行实验研究。受限于测距系统接收视场角(2 mrad)、激光发射角(1.5 mrad)以及发射准直透镜和接收透镜中心距(25 mm)等条件,理论上入射激光的照明

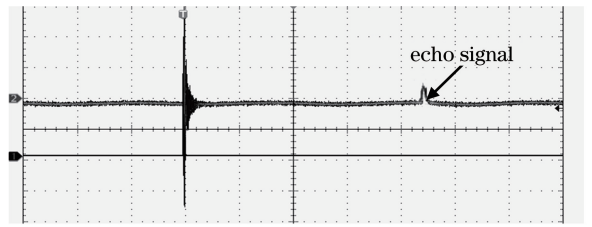


图 6 远距离测量的回波信号波形

Fig. 6 Waveform of echo signal for long-distance measurement

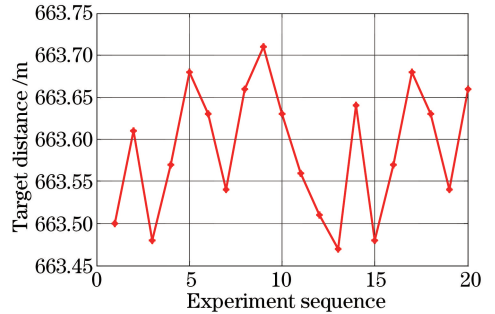


图 7 20 次远距离测距实验结果

Fig. 7 Measurement results of 20 long-distance measuring tests

区域将在 7.14 m 处与系统的接收视场发生交叠。因此,在确定系统的最小可测距离时,将系统的发射光轴与接收光轴以一个角度交叉放置,以使接收视场覆盖激光光斑,如图 8 所示。以普通白纸为探测目标,20 次重复测距的实验结果如图 9 所示。由统计分析可知,系统的最小可测距离为 0.2 m,测距精度为 0.6 mm。

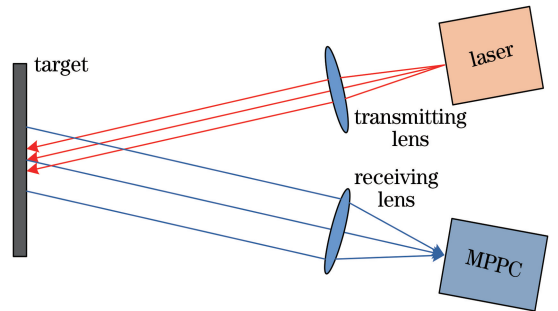


图 8 最小可测距离实验的设置

Fig. 8 Implementation of minimum detectable distance detection

综上所述,近距离情况下,以普通白纸为目标,测得系统的最小可测距离为 0.2 m;远距离情况下,以混凝土建筑物为目标,测得系统的最大可测距离为 663.58 m。在不考虑目标反射率差异的情况下,基于大目标激光雷达方程,可知系统的探测动态范围为 1.1×10^7 。由于近距离目标白纸的反射率大于

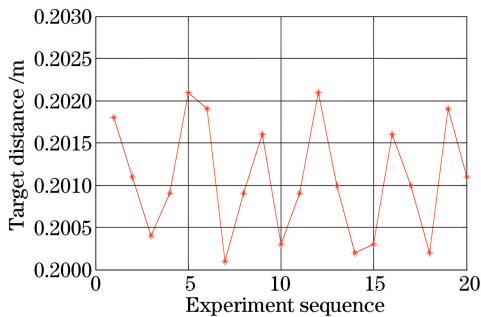


图 9 20 次近距离测距实验结果

Fig. 9 Measurement results of 20 short-distance measuring tests

远距离目标建筑物的反射率,因此,系统的实际探测动态范围将优于 10^7 。

3.2 系统测距精度

在进行近距离测量时,单光子探测器近似工作在模拟探测模式下,输出回波信号较强,因此可减少全回波的叠加次数,并根据累加次数调整峰值计算的阈值。实验中,以距离系统 10 m 以内的漫反射墙面作为测试目标,且激光脉冲峰值功率为 3 W,发射激光脉冲宽度为 6 ns,全回波的累加次数为 24 次。经过 20 次重复实验,所得测距结果如图 10 所示。由统计分析可知,漫反射墙面与系统的距离为 7.7526 m,测距精度为 0.6 mm。

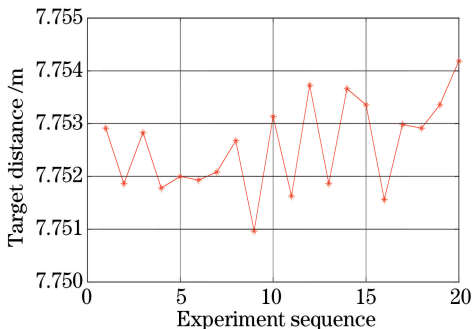


图 10 20 次测距实验结果

Fig. 10 Measurement results of 20 measuring tests

实际测距时,回波信号的信噪比会影响系统的测距精度。近距离测距时,回波信号的信噪比较高,系统的测距精度高;远距离测距时,回波信号的信噪比较低,系统测距精度降低。因此,本文设计的测距系统在最大测程 663.58 m 处的测距精度约为 75.3 mm,而在近距离测距时,测距精度可达 0.6 mm。

理论上,提高信号的采样速率可以提高系统的测距精度,但是,系统的制造成本也会随之增加。目前,插值算法以及多次测距求平均的处理方式,是提

高系统测距精度的主要手段,但有可能影响系统的处理速度。对于本文设计的测距系统而言,由于系统具有较高的测距速率,即便采用多次测量求平均的方式,仍然能够保持较快的测距结果输出,满足高速测距的要求。

3.3 系统测距准确度

为了验证系统测距的准确性,在实验室内设计了测距准确度测定实验。在带有钢板尺的导轨上安装靶板,靶板为黑色金属喷漆漫反射目标。兼顾测距系统的测距能力和实验条件,设置靶板与系统的初始距离为 8 m。实验时,以 10 mm 间隔逐次增加靶板与系统间的距离并依次进行测距实验。实验结果如图 11 所示,比较系统的测距结果与靶板的实际距离值,可知测距系统在 8.03 m 处的测距偏差最大,测距偏差为 -10 mm。因此,系统的测距准确度在 ± 10 mm 范围内。

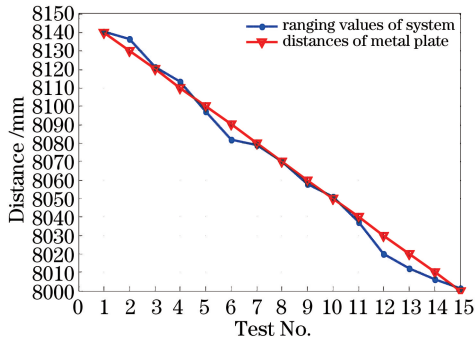


图 11 测距准确度测试结果

Fig. 11 Results of ranging accuracy test

4 结 论

所提激光测距系统基于单光子探测器 MPPC 的高灵敏度特性以及多回波光子信号累加输出的特性,实现了远距离和大动态范围的激光测距,借助高速信号采集技术以及波形累加的信号处理方法,有效提高了系统的测距精度。实验结果表明,所设计的激光测距系统的测距范围为 0.20~663.58 m,动态探测范围可达 10^7 。在高信噪比情况下,系统测距精度为 0.6 mm;在最大测程和低信噪比的情况下,系统测距精度为 75.3 mm,实验结果与理论分析结果一致。同时,该系统具有体积小、质量轻和多回波探测等优点,可满足对体积、质量和功耗要求较高的应用需求,极大地拓展了激光测距技术的应用领域。

参 考 文 献

[1] Wu Y, Lan W, Xu D P, et al. Design of an obstacle

- avoidance system for navigation of unmanned vehicles with single-line laser radar [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(7): 1902-1904, 1907.
- 吴越, 蓝伟, 许大浦, 等. 一种基于单线激光雷达的无人车辆导航避障系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(7): 1902-1904, 1907.
- [2] Bers K, Schulz K R, Armbruster W. Laser radar system for obstacle avoidance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5958: 59581J.
- [3] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, *et al.* Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104002.
- 吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104002.
- [4] Luo Y, He Y, Geng L M, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514001.
- 罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514001.
- [5] Yang F, Zhang X, He Y, *et al.* Fiber laser ranging system based on different pseudo-random code modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0614003.
- 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0614003.
- [6] Gao W, Ma S W, Duan Y Y. High precision multi-pulse laser ranging echo detection technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 135-139, 145.
- 高玮, 马世伟, 段园园. 高精度多脉冲激光测距回波检测技术[J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 135-139, 145.
- [7] Xu H. Electronics system design for laser ranging radar based on high speed pseudorandom modulation technique[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015: 1-8.
- 徐恒. 高速伪随机码调制激光测距雷达电子学系统设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 1-8.
- [8] Yang W J. Development of pseudo-random code and analysis of pseudo-random code ranging technology [J]. *China Science & Technology Overview*, 2016(15): 18-19.
- 杨文君. 伪随机码的发展以及伪随机码测距技术浅析[J]. *信息技术与应用*, 2016(15): 18-19.
- [9] Yang R, Zhang G F, Zhang Z C, *et al.* Design and experiment of a laser ranging scheme for aerospace applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 700-706.
- 杨冉, 张高飞, 张紫辰, 等. 一种面向空间应用的激光测距方案设计与实验[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 700-706.
- [10] Dai Y J. *Laser radar technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 179-183.
- 戴永江. *激光雷达技术* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 179-183.
- [11] Hou L B, Huang G H, Kuang Y W, *et al.* Research of photon counting laser ranging technology [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(18): 5186-5190.
- 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5186-5190.